

4.1.2 Coulombův zákon

Předpoklady: Newtonův gravitační zákon, výpočty s kalkulačkou

Vědci se dlouho neúspěšně snažili najít zákon pro elektrické působení nabitých těles (jako byly naše plechovky v minulé hodině) ⇒ 1784 Ch. A. Coulomb zkusil najít zákony pro elektrické působení bodových nábojů (obdoba Newtonova zákona) ⇒ vzorec pro elektrické působení: **Coulombův zákon:**

Dva bodové náboje na sebe působí elektrickou silou, jejíž velikost je určena vztahem:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2}$$

Náboje stejného znaménka se odpuzují, Náboje opačného znaménka se přitahují.

Coulombův zákon připomíná Newtonův gravitační zákon.

Shody:

	Coulombův zákon	Newtonův zákon
Vztah	$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2}$	$F = \kappa \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2}$
„Velikost příčin“	Q_1 Q_2 elektrický náboj	m_1 m_2 hmotnost
Vzdálenost	R	R
Konstanta	$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$	$\kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$

Poznámka: Konstanta k je označována jako Coulombova konstanta, nebo elektrostatická konstanta, případně často pouze jako konstanta úměrnosti v Coulombově zákonu. Nepatří mezi důležité fyzikální konstanty, protože je nahrazována způsobem, který je popsán v následující hodině.

Rozdíly:

Coulombův zákon	Newtonův zákon
Dva druhy náboje, přitažlivé i odpudivé síly.	Hmotnost vždy kladná, síla vždy přitažlivá.
Konstanta je velké číslo.	Konstanta je velmi malá.
Konstanta závisí na prostředí.	Konstanta nezávisí na prostředí.

Elektrický náboj Q :

- určuje velikost příčiny elektrické síly,
- dva druhy \pm ⇒ přitažlivé i odpudivé síly,
- jednotka Coulomb - 1 C,
- nelze jej libovolně dělit, existuje nejmenší možný náboj = **elementární náboj**
 $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (náboj elektronu a protonu),
- náboj nelze ani vyrobit ani zničit ⇒ zákon zachování elektrického náboje.

Zákon zachování elektrického náboje

Celkový elektrický náboj se vzájemným zelectrováním v izolované soustavě těles nemění.

⇒ Pokud jsme umělohmotnou tyč nabíjeli záporně, musel být hadr nabitý kladně.

Př. 1: Urči sílu, kterou by se odpuzovaly 2 bodové náboje o velikosti $0,01\text{ C}$ umístěné $0,5\text{ m}$ od sebe.

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{0,01 \cdot 0,01}{0,5^2} \text{ N} = 3\,600\,000 \text{ N}$$

Dva bodová náboje o velikosti $0,01\text{ C}$ umístěné $0,5\text{ m}$ od sebe se odpuzují silou $3\,600\,000\text{ N}$.

⇒ Ukázka toho, jak strašně velké jsou elektrické síly (silou $3\,600\,000\text{ N}$ je na povrchu země přitahován předmět o hmotnosti 360 tun , tedy dvěstěkrát těžší než běžný osobní automobil).

⇒ Náboje, se kterými jsme pracovali, byly daleko menší než $0,01\text{ C}$ (takto nabitá tyč by nepřitahovala pouze stanioly, ale zřejmě i žáky s lavicemi).

Př. 2: Urči elektrickou sílu, kterou se odpuzují 2 elektrony vzdálené $R = 10^{-9}\text{ m}$. Urči, kolikrát je elektrická síla větší než gravitační síla, kterou se přitahují. ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}\text{ kg}$)

Působení dvou elektronů: $Q_1 = Q_2 = e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$

$$F_e = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{(10^{-9})^2} = 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ N}$$

Přitahování dvou elektronů: $m_1 = m_2 = m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}\text{ kg}$

$$F_g = \kappa \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{(10^{-9})^2} = 5,5 \cdot 10^{-53} \text{ N}$$

$$\text{Poměr: } \frac{F_e}{F_g} = \frac{2,3 \cdot 10^{-10}}{5,5 \cdot 10^{-53}} = 4,2 \cdot 10^{42}$$

Odpudivá elektrická síla mezi dvěma elektrony je $4,2 \cdot 10^{42}$ silnější než jejich vzájemné gravitační přitahování.

Poměr $4,2 \cdot 10^{42}$ je strašně velký. Například hmotnost člověka je 10^{12} větší než hmotnost neuronu. Danému poměru bychom se příliš nepřiblížili, ani kdybychom srovnávali hmotnost nejtěžšího živočicha plejtváka obrovského, který je 10^{24} těžší než nejmenší samostatně žijící živá bytost bakterie.

Jak je možné, že ve skutečném makroskopickém světě není působení elektrických sil (vyjma elektrických přístrojů sestavených člověkem) příliš vidět?

V okolním světě je množství kladného a záporného náboje **velmi dobře vyrovnané**.

Př. 3: Dvě stejné ocelové kuličky $m = 100\text{ g}$ nabité stejně velkým souhlasným nábojem, vzdálené 1 metr od sebe se odpuzují silou $F = 1000\text{ N}$. Urči, kolikrát se v kuličkách při nabíjení zvětšil počet elektronů.

Nejdřív určíme náboj obou kuliček:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2} \quad \text{náboje jsou stejné} \Rightarrow Q_1 = Q_2 = Q$$

$$F = k \cdot \frac{Q^2}{R^2}$$

$$Q^2 = \frac{F \cdot R^2}{k}$$

$$Q = \sqrt{\frac{F \cdot R^2}{k}} = \sqrt{\frac{1000 \cdot 1^2}{9 \cdot 10^9}} \text{ C} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

Kolik elektronů tvoří tento náboj: $n = \frac{Q}{e} = \frac{3,3 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,1 \cdot 10^{15}$

Kolik bylo elektronů v kuličce předtím, když nebyla nabitá?

Molární hmotnost železa: $M_{Fe} = 56 \text{ g/mol}$.

1 mol ... $6 \cdot 10^{23}$ částic ... 56 g

x částic ... 100 g

$x = 1,07 \cdot 10^{24}$ atomů

Kolik kulička obsahovala elektronů, když jeden neutrální atom železa má 26 elektronů?

$26 \cdot 1,07 \cdot 10^{24} = 2,8 \cdot 10^{25}$ elektronů

Jaký je poměr?

$$\frac{\text{nové elektrony}}{\text{původní elektrony}} = \frac{2,1 \cdot 10^{15}}{2,8 \cdot 10^{25}} = \frac{1}{10^{10}} \Rightarrow \text{na 10 miliard původních elektronů přibyl 1}$$

nový.

Při nabíjení kuliček na náboj nutný k vyvolání síly 1000 N bylo nutné přidat na 10 miliard původních elektronů jeden nový.

Velikost elektrické síly je tak obrovská, že všechny efekty, které budeme zkoumat nastávají už při velmi malé nerovnováze mezi oběma náboji.

Pedagogická poznámka: Předchozí příklad kontrolujeme s celou třídou po jednotlivých krocích.

Smyslem všech tří předchozích příkladů je kromě procvičení vzorce pro Coulombův zákon přiblížení síly elektrického přitahování. Na obrovskou velikost elektrické síly budu odkazovat například při výkladu elektrostatického stínění.

Př. 4: Průměr atomu vodíku je přibližně 10^{-10} m . Urči sílu, kterou přitahuje jádro obíhající elektron. Urči frekvenci, se kterou by musel elektron kolem jádra obíhat, aby se udržel na kruhové dráze 10^{-10} m .

a) přitažlivá síla jádra na elektron

$$F_e = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2} = k \cdot \frac{e^2}{R^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(5 \cdot 10^{-11})^2} = 9,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

b) frekvence obíhání

Elektrická síla hraje roli dostředivé síly $\Rightarrow F_e = F_d$.

$$k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2} = m \cdot \frac{v^2}{R} = m \cdot \omega^2 \cdot R$$

$$k \cdot \frac{Q_e \cdot Q_p}{m_e \cdot R^3} = (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \text{ platí: } Q_e = Q_p = e$$

$$\frac{k \cdot e^2}{4 \cdot m_e \cdot \pi^2 \cdot R^3} = f^2$$

$$f = \sqrt{\frac{k \cdot e^2}{4 \cdot m_e \cdot \pi^2 \cdot R^3}} = \frac{e}{2 \pi} \sqrt{\frac{k}{m_e \cdot R^3}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \pi} \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (10^{-10})^3}} \text{ Hz} = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

Elektron by musel obíhat kolem jádra s frekvencí $2,5 \cdot 10^{15}$ Hz .

Poznámka: V zadání příkladu je uveden podmiňovací způsob schválně. Představa elektronu obíhajícího jádro (podobně jako planeta obíhá Slunce) je součástí planetárního modelu atomu, o kterém je od jeho vzniku známo, že je chybný, neboť elektron by kvůli dalším zákonům elektromagnetismu svou energii ve zlomku sekundy vyzářil a spadl na jádro.

Shrnutí: Elektrické působení bodových nábojů popisuje zákon velmi podobný Newtonovu gravitačnímu zákonu. Elektrická síla je však daleko silnější než gravitační.